

生态安全条件下的土地利用格局优化模拟研究*

——以中国北方农牧交错带为例

苏伟 陈云浩** 武永峰 李京 张锦水

北京师范大学资源学院, 国家遥感中心全球变化与可持续发展研究部, 北京 100875

摘要 在综合使用“自上而下”的灰色线性规划(GLP)方法和“自下而上”的元胞自动机(CA)方法的基础上,建立了土地利用格局优化模拟 LUOS(land use pattern optimizing simulation model)模型,进行了中国北方农牧交错带生态安全条件下的土地利用格局优化模拟研究.通过 GLP 方法 8 个方面共 11 个生态安全约束条件的限定与单纯形法求解,得出 6 种情景下的总量控制优化方案;以宏观用地总量需求和微观土地供给相平衡为原则,利用具有复杂空间演变能力的 CA 模型,完成土地空间分配.模拟结果表明,与当前土地利用格局相比,在 2010 年林地和草地增加、耕地减少、城镇用地增加的优化情景下,研究区可同时获得满意的生态效益、经济效益和社会效益.

关键词 生态安全 土地利用格局 灰色线性规划 元胞自动机

生态安全是指人类生存和发展所需的生态环境处于不受或少受破坏与威胁的状态,亦即生态环境能满足人类的持续生存与发展需求,而不损害生态环境的潜力,是任何一个区域进行资源开发必须遵循的可持续发展准则^[1].土地利用格局优化,实质是土地资源合理配置和景观生态合理规划,可以协调生态效益、经济效益和社会效益三者之间的关系,其模拟研究已成为土地利用/覆盖变化研究的热点内容之一.有不少类似的研究着力于通过建立模型来探讨土地利用格局优化模拟的理论与方法,并进行了有益的探索.目前国际上很有代表性的 CLUE 模型是一种基于经验统计原理的多尺度表达模型,可从人口统计、土壤、地貌、气候等各方面进行统计分析,该模型已经分别成功应用于中美洲^[2]、厄瓜多尔^[3]、中国^[4]和印度尼西亚^[5]的土地利用变化模拟工作中.但是其反映土地利用微观格局演化复杂性特征的能力比较弱^[6],适用于大尺度(像元大小介于 7 km×7 km 到 32 km×32 km 之间)

土地利用变化空间模拟分析,难以检测小区域上发生突变的“热点”像元^[7].虽然人们在 CLUE 模型的基础上发展了适于小尺度的 CLUE-S 模型,解决了适用尺度问题,但是难以检测没有变化历史的土地利用变化情况(如对原始森林的砍伐).又比如新近发展的中国土地利用变化的情景模拟 SLUD 模型,不足之处是仅仅考虑了社会系统对土地利用的驱动作用,对自然和社会因素综合影响下的土地利用时空情景变化进行模拟的能力显得薄弱^[8].本文借鉴 SLUD 模型框架,综合考虑自然因素和社会因素对土地利用格局的影响,改进模型结构,建立了土地利用格局优化模拟 LUOS 模型,对研究区生态安全条件下的土地利用格局优化模拟进行了探索.

中国北方农牧交错带地区是指年平均降水量在 250—500 mm 的干旱、半干旱地区,是我国农业生产条件比较严酷、农业生产力比较低的部分,是我国的东北、华北农区与天然草地牧区分割的生态过渡带^[9],其核心范围是温带风沙草原与暖温带黄

2005-06-13 收稿, 2005-07-29 收修改稿

* 国家重点基础研究发展规划(G2000018600)、国家新技术研究发展计划(2002AA130020)和高等学校博士点基金(20030027014)资助项目

** 通讯作者, E-mail: cyh@ires.cn

土高原区^[10], 具体地理范围见图1. 自20世纪以来, 人们过度开垦草原与不合理的毁林开荒使本来就不连贯的贺兰山-阴山生态屏障更加脆弱, 以致风沙长驱直入鄂尔多斯西北部, “农牧业两败俱伤”; 水土流失、土地退化等情况十分严重, 成为一条可与非洲撒哈拉人口饥饿地带相比较的生态脆弱带. 更令人担忧的是: 不仅农牧交错带本身的生态环境受到破坏, 其负面影响还波及华北尤其是京津地区^[11]. 因此, 合理配置土地资源利用方式、优化土地利用格局意义重大.

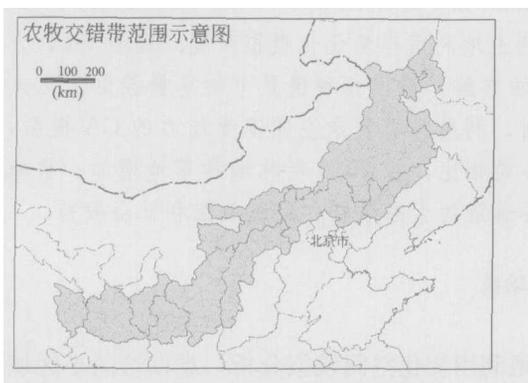


图1 中国北方农牧交错带区域示意图

1 模型

1.1 模型结构

该模型可以分为两部分: 非空间模拟和空间模拟部分(如图2). 非空间模拟部分主要是计算各土地利用类型的需求量, 选择了灰色线性规划(GLP)优化资源配置方法^[12]. 该方法中约束条件的约束值可以是变动的, 有的可以用时间序列来描述, 用GM(1, 1)模型^[13-15]进行预测得到, 是个区间数, 在土地利用格局优化中既可以按下限配置, 也可以按上限配置, 还可以根据实际的自然状况和社会经济发展状况使用区间中的任意白化值进行配置. 在区间内, 只要得到一组白化值, 便可得到一组优化方案, 从而使资源配置能够获得最优结构及其发展变化情况.

空间模拟部分是通过具有模拟复杂系统时空动态演化能力的元胞自动机(CA)来实现的. CA是定义在一个由具有离散、有限状态的元胞组成的元胞空间上, 并按照一定局部规则, 在离散的时间维上演化的动力学系统. 换言之, 元胞自动机就是一个元胞空间和定义于该空间的变换函数, 由组成元胞、元胞空间、邻居及规则四部分所组成^[16]. 各土

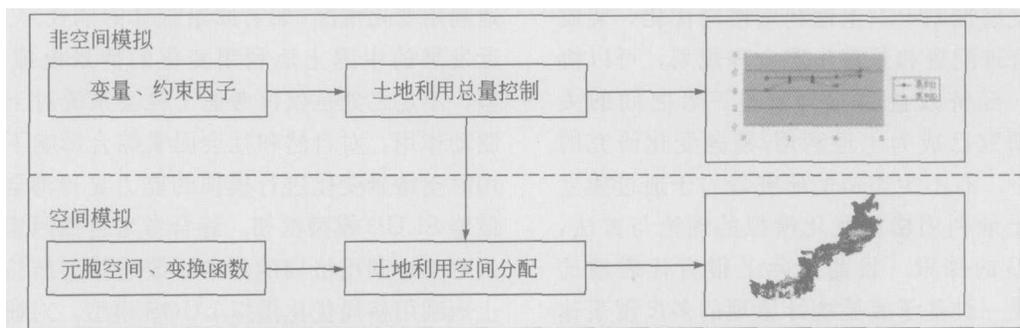


图2 模型结构

地利用类型的分布具有分布式特征, 元胞是“自下而上”研究其离散分布微观特征的载体, 两者具有相互结合的相似、相通之处.

1.2 模型框图

利用LUOS模型进行生态安全条件下的土地利

用格局优化的具体思路为: 在宏观GLP方法生态安全约束条件的控制下, 利用元胞及邻居的状态, 通过规则/变换函数完成中国北方农牧交错带土地利用优化格局的空间配置, 实现宏观与微观结合、空间模型与社会经济模型结合, 模型组成如图3.

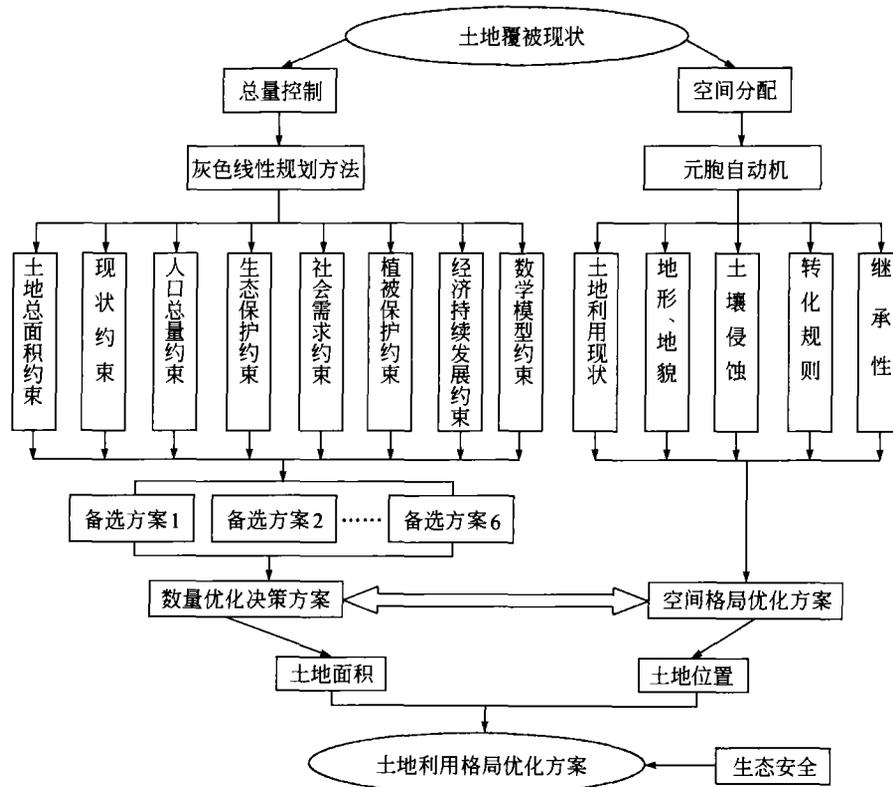


图3 中国北方农牧交错带生态安全下的土地利用格局优化 LUOS 模型框图

2 土地利用格局优化

2.1 基于 GLP 方法的总量控制

2.1.1 变量设置 根据 1989, 1994, 1999 年 NOAA/AVHRR 1 km 低分辨率遥感资料在 ERDAS IMAGE 中的分类结果与相应年份的统计数据^[17,18], 结合研究区土地资源特点和研究需要与目的, 共设耕地、林地、草地、水域、城镇用地和难利用地 6 个变量, 分别用 $x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6$ 来表示。

2.1.2 约束条件 为实现中国北方农牧交错带生态安全条件下土地利用持续发展, 总量控制通过 GLP 方法提出 8 个方面共 11 个约束条件来进行其土地利用格局优化模拟, 具体论述如下:

(1) 土地总面积约束. 各类土地面积之和应该等于土地总面积, 即

$$x_1 + x_2 + x_3 + x_4 + x_5 + x_6 = 72649456 \text{ hm}^2 \quad (1)$$

(2) 实际情况约束. 城镇用地一般大于现状面积; 鉴于农业生产发展的可能性和研究期较短 (仅 10 年) 这两个原因, 研究中假设水域、难利用地面积保持不变, 即

$$x_5 \geq 72050 \text{ hm}^2; x_4 = 79010 \text{ hm}^2; x_6 = 3342830 \text{ hm}^2. \quad (2)$$

(3) 人口总量约束. 农用地和城镇用地承载的人口应控制在 2010 年预测人口之内, 即

$$0.72 \times (x_1 + x_2 + x_3) + 51.64 \times x_5 \leq 81791975 \text{ hm}^2, \quad (3)$$

式中 0.72 和 51.64 是人口承载力指数, 都是通过 GM(1, 1) 模型预测得到的, 其中 0.72 为农用地的平均预测密度, 51.64 为城镇用地的平均预测密度; $x_1 + x_2 + x_3$ 为农用地面积; x_5 为城镇用地面积; 81791975 为预测总人口, 是灰化区间 [78301350, 82208977] 内的一个理想白化值。

(4) 生态保护约束. 许多研究表明, 不同土地覆被类型的径流量和土壤冲刷量大小依次为: 裸露地 > 农地 > 牧草地 > 林地^[19,20], 因此在满足土壤冲刷量较小的土地覆被类型最大供应量的基础上, 并将其合理配置, 从而最大程度的减少区域土壤侵蚀量, 以保证生态安全^[21]. 其约束不等式为

$$x_2 \geq 9264880 \text{ hm}^2. \quad (4)$$

(5) 社会需求约束. 粮食单产的灰区间取 1515—2100 kg · hm⁻², 下限为 1999 年粮食单产水平, 上限是用 GM(1, 1) 模型预测值, 经综合分析, 2010 年粮食单产取区间值 1890 kg · hm⁻² 和上限值 2100 kg · ha⁻¹ 作为其白化值. 以小康水平 (400 kg/人) 为测算标准, 得出粮食需求总量灰区间 [27405472500, 28773141950] kg. 其约束不等式为

$$1890 \text{ kg hm}^{-2} \times x_1 \geq 350 \times 81791975 \text{ kg}, \quad (5)$$

其中 350 kg 为预测年每人的粮食需求量.

(6) 植被保护约束. 最大限度控制土壤侵蚀的加剧, 规划年各级土壤侵蚀面积不能够大于基年各级土壤侵蚀面积, 将各级侵蚀强度面积不等式整理后得到

$$0.67 \times (x_1 + x_2 + x_3 + x_4 + x_5 + x_6) \leq 4869139677 \text{ hm}^2. \quad (6)$$

(7) 在满足生态效益增长的基础上经济效益持续增长. 以生态与经济协调发展为目标, 选择 GDP 和种植业产值、林业产值、牧业产值作为评价指标进行约束:

$$2180.068x_1 + 523.29x_2 + 733.885x_3 + 10567.339x_4 + 2507216.814x_5 \geq 302209000000 \text{ hm}^2, \quad (7)$$

$$2180.068 \times x_1 + 523.29 \times x_2 + 733.885 \times x_3 \geq 62042914330 \text{ hm}^2, \quad (8)$$

式中各系数分别为耕地、林地、草地、水域和城镇用地单位面积上的收益 (元 · hm⁻²), 是将历史数据中的单位面积收益用 GM(1, 1) 模型预测得到.

(8) 数学模型要求约束: 满足 $x_i \geq 0, i = 1, 2, 3, 4, 5, 6$.

2.1.3 目标函数

$$F(x) = 2180.068x_1 + 523.29x_2 + 733.885x_3 + 10567.339x_4 + 2507216.814x_5 + 68.283x_6. \quad (9)$$

目标函数中的系数分别为耕地、林地、草地、水域、城镇用地和难利用地单位面积上的收益 (元 · hm⁻²), 计算方法与 (7) 式同. 方程的求解方法为单纯形法, 就是将目标函数和基变量表示成单纯形表后选择主元, 确定进基变量和出基变量并不断的进行迭代, 最终找到最优解^[22,23].

2.1.4 土地利用格局优化总量控制方案 从数学角度讲, 其白化值可以取灰色区间的上、下限值, 也可以取区间中的任意值, 因而优化方案可以有无数个. 结合实际情况, 本研究选取了人口和粮食单产的上限值、下限值和中间值, 这样我们就得到 9 种优化方案. 考虑到该地区可持续发展原则和小康生活水平发展目标, 本文将粮食单产下限对应的 3 种方案分别剔除, 因而得到表 1 中的 6 种供选方案.

表 1 土地利用格局优化模拟方案比较

	方案 1	方案 2	方案 3	方案 4	方案 5	方案 6
人口/人	78301350	81791975	82208977	78301350	81791975	82208977
单产/(kg · hm ⁻²)	2100	2100	1890	1890	1890	2100
耕地/hm ²	13054299	13627922	15223885	14500250	15146662	13701496
林地/hm ²	9264880	9268954	9264393	9268954	9264880	9264393
草地/hm ²	46817053	46235282	44643393	45367028	44720616	46165782
水域/hm ²	79010	79010	79010	79010	79010	79010
城镇用地/hm ²	91384	95457	95944	91384	95457	95944
难利用地/hm ²	3342830	3342830	3342830	3342830	3342830	3342830

方案 1 是在十分重视生态效益、大量的退耕还林还草、计划生育指标控制较紧、农业科技进步使粮食单产快速增长情况下的土地利用格局模拟方案, 城镇的利用率高, 水域和难利用地不变. 在这种情景下, 经济发展较快, 生态环境质量较高, 实现的难度较大. 方案 4 与方案 1 的情况和目标相似, 人口控制较严, 但单产增长速度相对小. 方案 2 是在充分考虑生态效益、人口按照国家计划控制增长、粮食单产快速增长情况下的优化方案. 该方案综合考虑了生态效益、经济效益、国家人口政策限制, 实现的难度较小, 是一种比较理想的优化方案. 方案 5 情况与方案 2 比较相似, 只是其生态效益不理想. 方案 3 是假设在计划生育控制不严(以 8.93% 的增长率增长)情况下的优化方案, 生态效益不是很理想.

2.2 基于 CA 的空间分配

2.2.1 CA 特征定义

(1) CA 元胞定义: 元胞空间分辨率与 DEM 分辨率一致, 为 1000 m × 1000 m, 共有耕地、林地、草地、水域、城镇用地和难利用地 6 种元胞类型, 各类型之间按照相应的转换概率进行转化.

(2) CA 元胞状态: 元胞状态为耕地、林地、草地、水域、城镇用地、难利用地转换概率的离散集, 对于每一个元胞来说, 按照最大转化概率向下一状态进行转化.

(3) CA 元胞空间: 土地利用格局元胞空间为中国北方农牧交错带, 边界为县域行政区划边界. 采用四方网格形式对元胞空间进行划分, 这种元胞形状适合于在计算机环境下进行表达显示; 利用定值型方法进行边界条件的限定; 元胞状态的空间分布组合通过多维的整数矩阵来表达.

(4) 邻域: 本研究采用 Moore 型邻域结构, 以任一栅格为中心, 周围分布 8 个代表特定土地覆被类型的相邻栅格. 为了衡量相邻边界的邻接度, 赋予每一个相邻边界类型一个数量值, 横向和竖向相邻为 2, 斜向相邻为 1, 任一栅格的相邻边界数量总和为 12. 元胞邻域的状态组合决定元胞的个体行

为^[24].

2.2.2 CA 规则定义 各土地利用类型的行为规则是: 在生态安全条件的限制下, 依据土地适宜性, 参照元胞的继承性及邻域的约束影响, 确定转化概率, 按照城镇用地、林地、草地、耕地的顺序进行分配, 在满足前一种土地利用类型总量需求的基础上, 再分配下一种土地利用类型, 直到所有用地需求总量都满足为止. 土地适宜性可以表达地形、土壤质地等自然因素和诸如“坡度在 25° 以上的耕地还林还草”等国家政策的要求. 局部规则的定义如下式:

$$f: L_{i,j}^t = f[(S_{i,j}^t, S_{n,i,j}^t), D_{i,j}^t, SG_{i,j}^t, N_{i,j}^t, I_{i,j}^t], \quad (10)$$

式中 $(S_{i,j}^t, S_{n,i,j}^t)$ 为时刻 t 时 (i, j) 位置处的中心元胞及其邻域核心状态(土地利用类型)组合, 其他变量为辅助变量. $D_{i,j}^t$ 表示 (i, j) 位置处格网与邻域的方向坡度, 坡度在 25° 以上的耕地单元适宜性为 0, 草地和林地的适宜性为 1. $SG_{i,j}^t$ 为综合考虑元胞代表的土壤类型和地貌状况, 经专家打分法确定其适宜性. $D_{i,j}^t$ 地形辅助变量和 $SG_{i,j}^t$ 土壤辅助变量共同作用, 衡量土地适宜性. $N_{i,j}^t$ 为时刻 t 时 (i, j) 位置处各邻域对该栅格土地利用类型转化的影响程度. 继承性 $I_{i,j}^t$ 可以依据各种土地利用类型惯性的强弱, 定义为 0 到 1 之间的一个常量, 其值越大说明保持原有土地利用类型的惯性越强. 本研究中, 耕地、林地、草地、城镇用地、水域、难利用地的继承值分别为: 0.65, 0.9, 0.85, 1, 1, 1.

2.2.3 CA 结构 CA 中进行模拟运算的变量有两类: 核心状态变量(土地利用格局元胞)和辅助状态变量(DEM、土壤、地貌、邻域、继承性)^[25]. 核心状态变量为 1989、1994、1999 年土地利用数据; 辅助状态变量中 DEM 是将等高线数据在 GIS 插值生成, 土壤、地貌数据是通过 Arcinfo 中的 Coverage to Grid 命令转换为栅格形式的数据, CA 组成结构如图 4 所示.

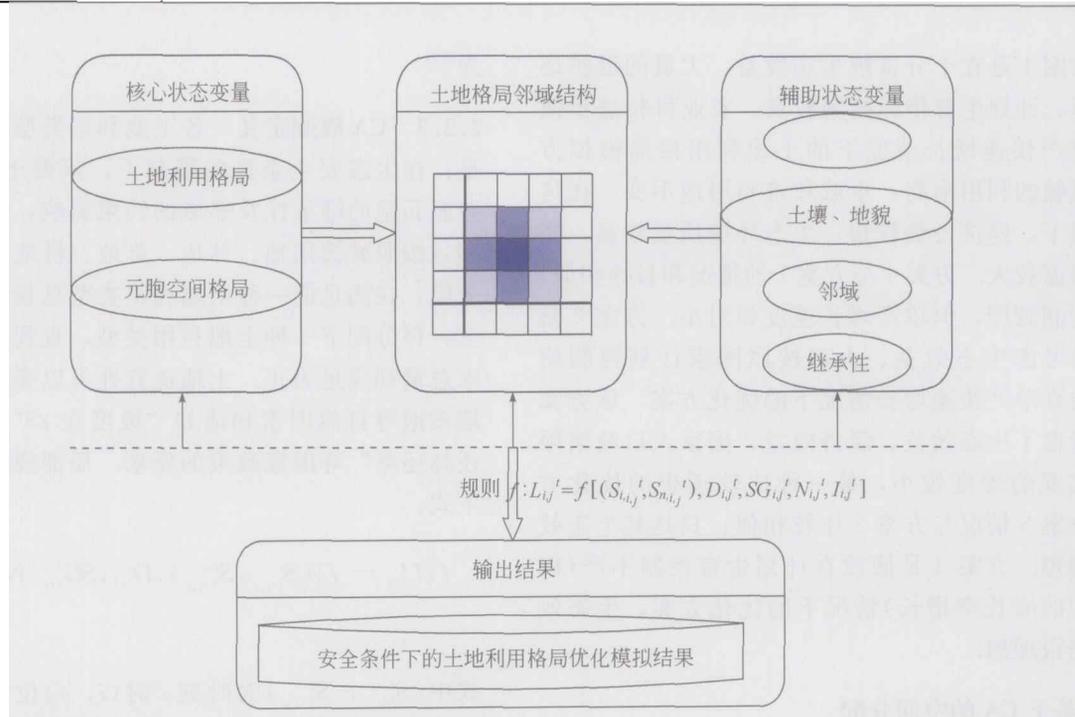


图4 CA组成结构图

3 LUOS模型运行结果的讨论

结合使用GLP方法和CA思想建立了LUOS模型,运行该模型得到了理想的土地利用格局优化结

果,其合理性可以通过下面的模型运行结果来验证:

(1) 执行国家制定的“坡度在 25° 以上的耕地退耕还林还草”的政策将坡度 25° 以上的耕地转化为林地,模型运行结果如图5.

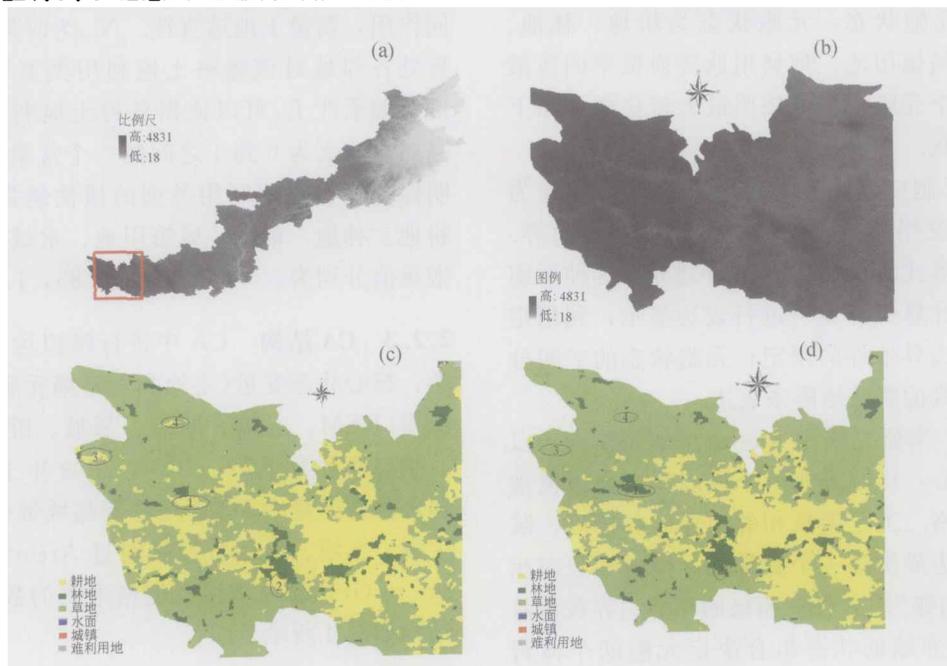


图5 土地利用格局优化模拟前后比较(耕地)

(a) 农牧交错带地形图; (b) 对比区地形图; (c) 优化前土地利用格局图; (d) 优化后土地利用格局图

(2) 城镇的布局在现实生活已经确定, 改变用途的几率很小. 由于人口的增长, 城镇的面积要扩大, 基于生态安全的考虑, 可以将城镇的增长视为农用地城镇化的结果. 这就是城镇元胞扩张的问

题, 考察的焦点是非城市元胞, 按照草地、耕地、林地元胞的顺序依次转化, 模型运行结果如图 6.

利用 GIS 软件将土地利用格局优化模拟前后的结果图件进行空间分析, 得到表 2 所示的统计结果.

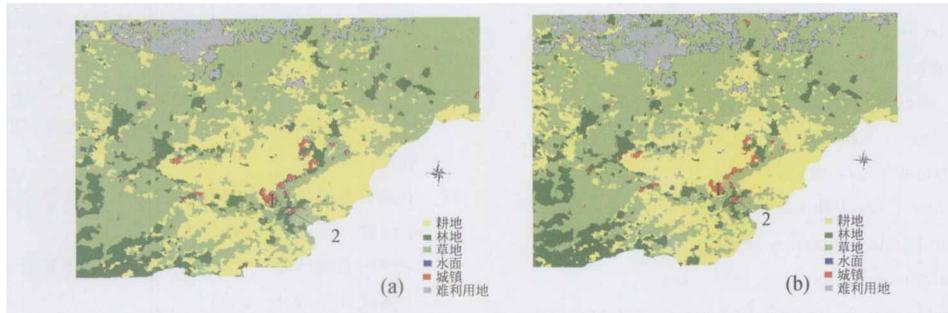


图 6 土地利用格局优化模拟前后比较(城镇用地)

(a) 优化前城镇分布图; (b) 优化后城镇分布图

表 2 土地利用格局优化前后面积比较

土地利用类型	耕地	林地	草地	水域	城镇用地	难用地
优化模拟前面积/hm ²	16850804.7	9264879.9	43039880.9	79010.2	72049.5	3342829.8
优化模拟后面积/hm ²	13627922.2	9268954.3	46235282.2	79010.2	95457.0	3342829.8
面积绝对变化量/hm ²	-3222882.5	4074.4	3195401.3	0	23407.5	0
相对变化百分比/%	-19.13	0.04	7.42	0	32.49	0
变化分布范围	中段和西段减少	西段增加较多	中段增加较多	假设不变	东段增加的幅度大	假设不变

从表 2 可以看出, 中部和西部主要表现为耕地减少、林地增加, 草地在整个研究区内都有增加和减少的区域出现. 这样的土地利用格局有利于加固本来不连贯的贺兰山-阴山脆弱的生态屏障, 对改善生态环境意义重大.

4 结论

中国北方农牧交错带是一个生态脆弱区, 对其进行生态安全条件下的土地利用格局优化模拟意义重大. 本文在分析该区土地覆被变化、土壤侵蚀状况、人口发展趋势和经济发展状况的基础上, 从宏观外部约束性因素和局部土地格局单元演化共同影响土地利用格局的角度, 以生态安全为目标, 进行了土地利用格局优化模拟研究, 其结论如下:

(1) LUOS 模型以 GLP 模型为基础, 利用 GM (1, 1) 趋势预测模型进行 2010 年人口、粮食单产、经济水平预测; 然后以 CA 思想为指导, 结合 GIS 技术, 完成不同优化方案下的土地空间分配. 其结果表明, 研究区内粮食单产水平较低, 人口增长的

速度较之经济发展速度而言较快. 粮食产量下降, 主要是因为人们不合理的利用土地, 盲目的毁林开荒, 造成土壤侵蚀、水土流失加重, 土壤质量下降. 可以采取的措施就是合理的退耕还林还草, 进行土地利用格局优化配置, 改善生态环境.

(2) 研究区黑龙江、吉林、辽宁等东北部分地势较低, 土壤侵蚀较轻, 是城镇用地的主要分布区, 向西南延伸至青海东部地势逐渐升高. 模型运行结果表明, 农牧交错带内甘肃、陕西、内蒙古所辖的县(市)区内土壤侵蚀较为严重, 有一定数量的耕地需要还为林地和草地, 以保证研究区的生态安全.

(3) 土地利用系统是一个复杂的系统, 而我们收集到的资料有限, 因此目前的研究还存在着一定的不足, 需要进一步努力的地方是, 增加降水、温度等气候条件, 提高模型的模拟能力. 此外, 其空间分配尚不能自动演变土地利用类型的突变情况, 如因新矿区的发现而引发的新城镇出现, 优化模型有待于进一步改进.

参 考 文 献

- 1 刘勇, 刘友兆, 徐萍. 区域土地资源生态安全评价-以浙江嘉兴市为例. 资源科学, 26(3): 69—75
- 2 Kok K, Winograd M. Modeling land-use change for Central America with special reference to the impact of hurricane Mitch. *Ecological Modeling*, 2002, 149: 53—69
- 3 Koning G H J, Verburg P H, Veldkamp A, et al. Fresco. Multi-scale modeling of land-use change dynamics for Ecuador. *Agricultural Systems*, 1999, 61: 77—93
- 4 Verburg P H, Chen Y Q, Veldkamp A. Spatial explorations of land-use change and grain production in China. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2000, 82: 333—354
- 5 Verburg P H, Veldkamp A, Bouma J. Land use change under conditions of high population pressure: The case of Java. *Global Environmental Change* 1999, 9: 303—312
- 6 Veldkamp A, Fresco L. O. CLUE: A conceptual model to study the conversion of land use and its effects. *Ecological Model*, 1996, 85: 253—270
- 7 Verburg P H, Veldkamp W S A, Espaldon R L V, et al. Modeling the spatial dynamics of regional land use: The CLUE-S Model. *Environmental Management* 2002, 30(3): 391—405
- 8 何春阳, 史培军, 李景刚, 等. 中国北方未来土地利用变化情景模拟. *地理学报*, 2004, 59(4): 599—607
- 9 王静爱, 徐霞, 刘培芳. 中国北方农牧交错带土地利用与人口负荷研究. *资源科学*, 1999, 21(5): 19—24
- 10 张兰生. 中国生存环境历史演变规律研究(一). 北京: 海洋出版社, 1993
- 11 伍光和, 王文瑞. 地域分异规律与北方农牧交错带的退耕还林还草. *中国沙漠*, 2002, 22(5): 439—442
- 12 康慕谊, 姚华荣, 刘硕. 陕西关中地区土地资源的优化配置. *自然资源学报*, 1999, 14(1): 363—367
- 13 袁嘉祖. 灰色系统理论及其应用. 北京: 科学出版社, 1991
- 14 耿红, 王泽民. 基于灰色线性规划的土地利用结构优化研究. *武汉测绘科技大学学报*, 2000, 25(2): 167—182
- 15 邓聚龙. 多维灰色规划. 武汉: 华中理工大学出版社, 1990
- 16 周成虎, 孙战利, 谢一春. 地理元胞自动机研究. 北京: 科学出版社, 2001
- 17 中国国家统计局, 中国县(市)社会经济统计年鉴-2001. 北京: 中国统计出版社, 2001
- 18 中国国家统计局, 中国县(市)社会经济统计年鉴-2003. 北京: 中国统计出版社, 2003
- 19 邱扬, 傅伯杰. 异质景观中水土流失的空间变异与尺度变异. *生态学报*, 2004, 24(2): 331—337
- 20 邱扬, 傅伯杰, 王勇. 土壤侵蚀时空变异及其与环境因子的时空关系. *水土保持学报*, 2002, 16(1): 108—111
- 21 陈云浩, 李晓兵, 史培军, 等. 地表覆被格局对区域生态安全影响的模拟试验. *自然科学进展*, 2004, 14(11): 1244—1248
- 22 胡乾, 杨宏. 线性规划求解. <http://www.tjIdx.com/learn>
- 23 耿修林. 统筹学. <http://tjae.tongji.edu.cn/course>
- 24 王凌, 李秀珍, 郭笃发. 辽河三角洲湿地以丹顶鹤生境保护为核心的退耕预案研究. *生态学报*, 2004, 24(8): 1708—1717
- 25 吴欢, 陈秀万, 易永红, 等. 元胞自动机在分布式流域汇流模型中的应用. <http://162.105.17.40/events/paper2.pdf>